文章编号：1673-3363-(2012)04-0481-06

深部高应力软岩巷道变形破坏特性研究

孟庆彬[1,2]，韩立军[1]，乔卫国[2]，林登阁[2]，吕言新[2]

（1．中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221008；
2．山东科技大学土木建筑学院，山东 青岛 266510）

摘要 以济北矿区唐口煤矿为工程背景，基于巷道围岩地质力学测试，阐述了深部高应力软岩巷道的基本工程地质特征；基于 Burgers 流变模型的黏弹性理论分析，得到深部高应力软岩巷道围岩表面位移及位移速率的表达式，并利用数学软件 Matlab 绘制了不同原岩应力、弹性模量和黏滞系数的巷道围岩表面位移及变形速率随时间的变化曲线；采用 FLAC^{3D} 模拟了深部高应力软岩巷道的流变特性，分析了在高应力作用下，软岩巷道围岩的顶板、底板和两帮的流变变形规律。

关键词 深部；高应力软岩巷道；变形破坏；黏弹性分析；FLAC^{3D} 数值模拟

中图分类号 TD 353 **文献标识码** A

Research on Deformation Failure Characteristics of the Deep High-stress Soft Rock Roadways

MENG Qing-bin[1,2]，HAN Li-jun[1]，QIAO Wei-guo[2]，LIN Deng-ge[2]，LV Yan-xin[2]

（1．State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering，China University of Mining & Technology，Xuzhou，Jiangsu 221008，China；2．College of Civil Engineering and Architecture，Shandong University of Science and Technology，Qingdao，Shandong 266510，China）

Abstract Based on the engineering background of Tangkou Mine, affiliated to Jibei Mining Area, the basic geological characteristics of the deep high-stress soft roadway are illustrated on the basis of geological mechanical test. According to the visco-elastic analysis of the Burgers model on deep high-stress soft rock roadway, the expressions of surface displacement and displacement rate of surrounding rock in deep high-stress soft rock roadway are obtained, and the curves of surface displacement and displacement rate of surrounding rock in deep high-stress soft rock roadway under the different geo-stresses, elastic modules and viscosity coefficients are achieved. FLAC^{3D} is used to simulate the rheological characteristics, analyzing the deformation features of the roof, floor and two-sides of the surrounding rock under high-stress.

Key words deep; high-stress soft rock roadway; failure characteristics; visco-elastic analysis; FLAC^{3D} numerical simulation

随着我国浅部煤炭资源趋于枯竭及矿井开采强度的不断增大，煤炭开采已由浅部逐渐向深部发展[1-3]。矿井进入深部开采阶段，巷道围岩地质条件更加复杂，地应力水平也越来越高，特别是在地质构造活动强烈地区，残余构造应力更大，在深部高应力状态下，软岩巷道围岩变形量大、变形速率快、持续时间长、流变性特别突出[4]，流变破坏是深部高应力软岩巷道失稳破坏主要形式之一[5]。大量的

收稿日期：2011-07-16
基金项目：国家自然科学基金项目（51174196）；教育部新世纪优秀人才支持计划项目（NCET-07-0519）
作者简介：孟庆彬（1985-），男，山东省菏泽市人，博士，从事岩体加固理论与应用技术方面的研究。
E-mail：mqb1985@126.com Tel：13951468390

工程实践表明，深部高应力软岩巷道开挖以后，巷道围岩一般不会在短时间内发生变形破坏，而是在高应力作用下表现出显著的流变特性，致使巷道围岩在变形延续较长时间后才产生破坏，具有明显的时效性[6-7]。

随着矿井开采深度的不断延伸，巷道围岩应力水平也逐渐增大，软岩的流变特性及其对巷道围岩稳定性的影响也越来越显著。因此，在深部高应力软岩巷道围岩稳定性分析中必须考虑软岩的流变特性[8]，本文基于阐述深部高应力软岩巷道的基本工程地质特征的基础上，采用理论分析和数值模拟相结合的方法，深入研究在高地应力作用下深部软岩巷道围岩的变形破坏特征。

1 深部高应力软岩巷道的基本工程地质特征

1）黏土矿物组成

采用 D/Max-3B 型 X 射线衍射仪，对岩样进行全岩矿物分析，分析结果详见表 1。

表 1 矿物 X—射线衍射分析报告（重量百分比%）

Table 1 Mineral X- beam diffraction analysis report (percent by weight %)

序号	岩样编号	K	Q	I	M	I/M	H	F	C	S	O
1	泥岩	65	22	1	2	3	4	/	/	/	余重
2	细砂岩	55	32	2	2	4	/	2	1	/	余重
3	泥岩	66	20	2	1	3	4	1	1	/	余重
4	B 层铝土	90	/	2	2	3	/	1	/	/	余重
5	粉砂质泥岩	73	14	1	3	3	2	1	/	/	余重

注：K-高岭石，I-伊利石，M-蒙脱石，I/M-伊蒙混层，Q-石英，H-赤铁矿，F-长石，C-方解石，S-菱铁矿，O-其他

由表 1 可知，−990 m 水平井底车场围岩中的矿物成分以石英为主，呈块状结构；块体间胶结物为泥质含量较大，并且泥质黏土矿物成分以高岭石为主，高达 55%~90%；胶结物遇水发生膨胀变形、软化和泥化[9-10]，从而使得这部分围岩力学性质弱化。围岩中的黏土矿物在很大程度上决定了软岩的性质，这是形成高应力软岩的内因。

2）水理性质

由表 2 可知，软岩含水量不高，膨胀前含水率约为 2.4%~4.1%；吸水性较明显，膨胀后含水率约为 3.46%~4.97%，膨胀前后含水率变化约为 0.87%~1.78%；软岩吸水膨胀性不高，膨胀量约为 0.41%~1.17%。

表 2 副井泥岩膨胀性试验

Table 2 Mudstone expansion test of the auxiliary shaft

岩石名称	取样深度/m	膨胀前含水率%	膨胀后含水率/%	膨胀量/%	膨胀力/MPa
泥岩	901.0~903.7	2.4~3.0	4.18~4.39	1.17	0.023
泥岩	935.40~942.0	2.5~3.04	3.46~4.47	0.77	0.061
泥岩	1024.6~1025.6	3.68~4.1	4.62~4.97	0.41	0.012

3）力学性质

应用 MTS 岩石伺服试验机和液压式万能材料试验机对泥岩、细砂岩、泥岩、B 层铝土、粉砂泥岩等五种岩石进行了三轴抗压试验及单轴抗压试验，实验结果详见表 3。

由表 3 可知，泥岩组的单轴抗压强度为 21.38~38.83 MPa，泥岩的平均单轴抗压强度为 31.57 MPa；细砂岩的单轴抗压强度为 28.38 MPa；B 层铝土的单轴抗压强度为 25.36 MPa。由此可见，−990 m 井底车场围岩的力学强度较高，故只有在较高的应力水平下才会发生变形破坏；则在低应力状态下则表现出硬岩特性。

表 3 井底车场围岩力学性质试验结果

Table 3 Mechanical properties test results of the surrounding rock in shaft station

岩样名称	单轴抗压强度/MPa	三轴弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
泥岩	21.38	29944.3	0.253	4.851	41
细砂岩	28.38	23047.01	0.130	6.69	42
泥岩	34.51	24564.87	0.207	4.69	46
B 层铝土	25.36	25192.14	0.152	4.10	54
粉砂质泥岩	38.83	28859.63	0.168	6.37	52

4）地应力

唐口煤矿应力水平大，地应力对巷道或硐室围岩稳定影响显著。为了掌握地应力分布规律和优化巷道布置与支护设计，采用 YH3B-3 型环氧树脂三轴应变计按应力解除法进行了地应力测试，测试结果详见表 4。

由表 4 分析及计算[11]可知，1#孔最大主应力为 31.11 MPa，与铅垂方向夹角约为 34°，垂直应力分量为 25.62 MPa，水平应力分量（东西向）为 19.15 MPa，水平应力分量（南北向）为 11.49 MPa；2#孔最大主应力为 27.91 MPa，与铅垂方向夹角约为

41°，垂直应力分量为 23.77 MPa，水平应力分量（东西向）为 14.34 MPa，水平应力分量（南北向）为 23.04 MPa；3#孔最大主应力为 36.09 MPa，与铅垂方向夹角约为 70°，垂直应力分量为 8.79 MPa，水平应力分量（东西向）为 5.97 MPa，水平应力分量（南北向）为 30.65 MPa。

表 4　地应力测试结果

Table 4　Geostress test results

测点编号	测点位置	距地表深度/m	主应力大小/MPa	主应力方向夹角/(°)		
			σ_1 / σ_2 / σ_3	V(垂直)	W(东西)	N(南北)
1#孔	回风石门大巷	1030	31.107	34.091	55.91	90.166
			15.032	118.352	45.22	58.159
			10.117	72.678	115.819	31.842
2#孔	西翼辅助运输石门	1028	27.91	41.238	79.241	129.21
			19.90	54.656	74.161	39.765
			13.35	108.42	19.310	95.581
3#孔	回风石门大巷	1030	36.088	70.803	74.203	25.27
			6.671	35.635	66.04	114.69
			2.948	118.75	29.268	95.033

注：地应力分量坐标系取 X 轴正向指北，Y 轴正向指东，Z 轴正向垂直向下。

地应力实测结果表明，1#孔、2#孔以垂直应力为主，属于自重应力场型，1#孔最大水平应力（东西方向）基本与回风石门大巷轴向平行，有利于其稳定；2#孔最大水平应力（南北方向）基本与回风石门大巷轴向垂直，不利于其稳定；3#孔水平构造应力远大于垂直应力，属于以水平构造应力为主的构造应力场，最大水平应力（南北方向）基本与回风石门大巷轴向基本垂直，并且数值较大，极不利于巷道的稳定。

基于地应力实测结果分析可知，唐口煤矿−1000 m 水平处地应力水平整体较高，并且以自重应力为主，属于自重应力场型；但是局部由于断层、向斜构造等影响，地应力有所差异，水平构造应力突出，水平构造应力远大于垂直自重应力，属于构造应力场，这对矿井巷道布置与支护产生较大的影响。

5）软化灾变点

一般来说，高应力软岩具有明显的软化灾变点。在以自重应力为主的矿区，地应力水平主要与巷道埋深有关，故又把与软化灾变点应力水平相对应的巷道埋深称为软化临界深度[12]。

唐口煤矿巷道软岩属于古生代软岩，其临界深度为 550~650 m[13]，而−990 m 水平井底车场的埋深已经超过了软化临界深度。一般来说古生代软岩的软化应力多在 15~20 MPa 以上[12]，唐口煤矿地应力测试结果表明，其最大主应力为 27.91~36.088 MPa，远超过古生代软岩的软化应力。无论从软化临界深度来看，还是从古生代软岩的软化应力来看，唐口煤矿巷道软岩具有软化灾变点，这是形成高应力软岩的外因。

6）工程表现

高应力软岩的工程表现不同低应力软岩而有其特殊性，主要表现为[12]：具有高应力劈裂、压剪破坏等现象；初始变形速度快，唐口煤矿软岩巷道初始变形速率为 22~43 mm/d；巷道四周来压，矿压显现剧烈等等。

2　深部高应力软岩巷道围岩力学特性的黏弹性理论分析

Burgers 模型由 Maxwell 模型（M 体）和 Kelvin 模型（K 体）串联而成[14]，其本构方程可由本构模型串联法则得出。

Maxwell 模型本构方程：

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{M}}=\frac{\sigma_{\mathrm{M}}}{\eta_{\mathrm{M}}}+\frac{\dot{\sigma}_{\mathrm{M}}}{E_{\mathrm{M}}} \tag{1}$$

Kelvin 模型本构方程：

$$\sigma_{\mathrm{K}}=E_{\mathrm{K}}\varepsilon_{\mathrm{K}}+\eta_{\mathrm{K}}\dot{\varepsilon}_{\mathrm{K}} \tag{2}$$

由本构模型串联法则可知：

$$\begin{aligned}\sigma&=\sigma_{\mathrm{M}}=\sigma_{\mathrm{K}}\\ \varepsilon&=\varepsilon_{\mathrm{M}}+\varepsilon_{\mathrm{K}}\end{aligned} \tag{3}$$

联立式（1），（2），（3）式，可得 Burgers 流变模型的本构方程为：

$$\ddot{\sigma}+(\frac{E_{\mathrm{M}}}{\eta_{\mathrm{M}}}+\frac{E_{\mathrm{M}}}{\eta_{\mathrm{K}}}+\frac{E_{\mathrm{K}}}{\eta_{\mathrm{K}}})\dot{\sigma}+\frac{E_{\mathrm{M}}E_{\mathrm{K}}}{\eta_{\mathrm{M}}\eta_{\mathrm{K}}}\sigma=\eta_{\mathrm{K}}\ddot{\varepsilon}+E_{\mathrm{K}}\dot{\varepsilon} \tag{4}$$

式中：E_M，E_K 依次为 M 体、K 体中弹簧的弹性模量；η_M，η_K 依次为 M 体、K 体中粘壶的黏滞系数。

由式（4）分析可知：Burgers 模型有瞬时弹性、蠕变、应力松弛、弹性后效及黏性流动；其蠕变方程由应变随时间呈线性增加的主蠕变和应变随时间呈指数变化的次蠕变组成，可以揭示软岩的衰减蠕变和非衰减蠕变规律，模拟软岩流变的整个过程（包括 3 个阶段：衰减阶段即不稳定蠕变、等速蠕变即稳定流动阶段、加速蠕变即急剧流动阶段）。因此，本文采用 Burgers 流变模型进行深部高压力

软岩巷道流变特性的黏弹性理论分析及 FLAC^{3D} 数值模拟研究。

将软岩巷道简化为载荷与结构都是轴对称的平面应变圆孔问题，基于 Burgers 流变模型的黏弹性分析，得到深部高应力软岩巷道围岩表面位移及位移速率的表达式：

$$u_{r_0}(t)=\frac{pr_0}{2E_M}\{1+\frac{E_M}{\eta_M}t+\frac{E_M}{E_K}[1-\exp(-\frac{E_K t}{\eta_K})]\} \quad (5)$$

$$\dot{u}_{r_0}(t)=\frac{pr_0}{2E_M}[\frac{E_M}{\eta_M}+\frac{E_M}{\eta_K}\exp(-\frac{E_K t}{\eta_K})]$$

为了直观地反映不同原岩应力、弹性模量及黏滞系数的条件下巷道围岩的变形特性，取不同原岩应力及弹性模量、黏滞系数分别取原参数的 1.0，1.2，1.4，1.6，1.8，2.0 倍，采用 Matlab 绘制了不同原岩应力、弹性模量和黏滞系数的巷道围岩表面位移及变形速率随时间的变化曲线，如图 1~3 所示。

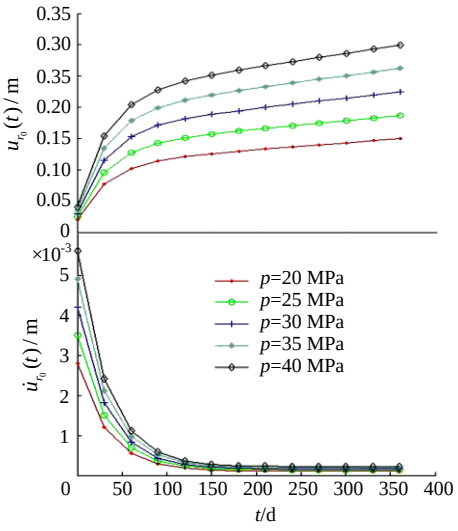

图 1 不同原岩应力作用下的巷道围岩表面位移和变形速率随时间的变化曲线

Fig.1 Changing curves of the surface displacement and the deformation rate of the surrounding rock with time variation under different original rock stress

由图 1~3 分析可知：巷道围岩的变形可分为衰减变形阶段和稳定变形阶段，巷道开挖后，巷道围岩的位移随时间的延续而增大，巷道围岩的初期变形速率最大；随时间的延长，围岩的变形速率呈衰减状态，之后围岩的变形速率为定值，围岩呈等速变形状态。原岩应力越高，围岩变形量和变形速率越快，巷道围岩的衰减、稳定变形阶段的斜率也随之增大；随着巷道围岩的弹性模量和黏滞系数的增大，巷道围岩移近量和变形速率而减小，巷道围岩的衰减、稳定变形阶段的斜率也随之减小。

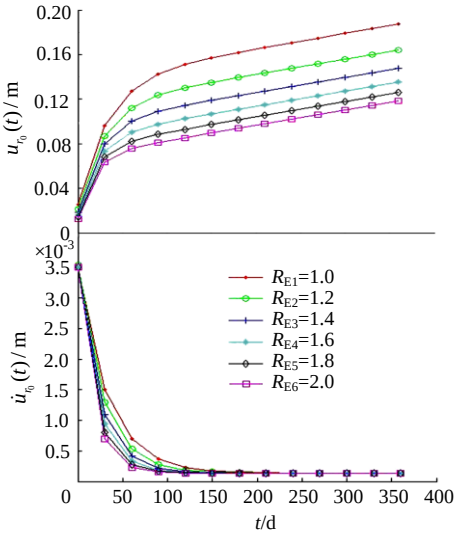

图 2 不同弹性模量下的巷道围岩表面位移和变形速率随时间的变化曲线

Fig.2 Changing curves of the surface displacement and deformation rate of the surrounding rock with time variation under different elastic moduli

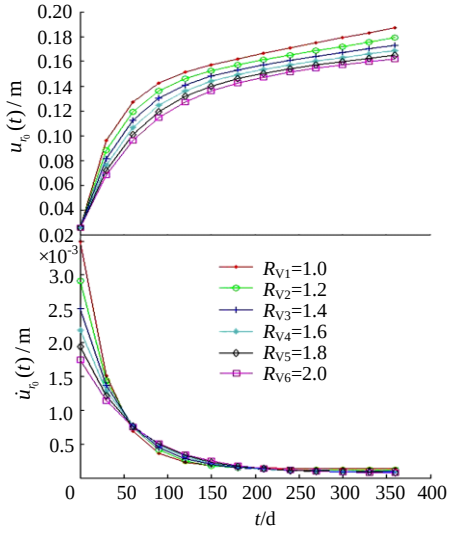

图 3 不同黏滞系数下的巷道围岩表面位移和变形速率随时间的变化曲线

Fig.3 Changing curves of the surface displacement and deformation rate of the surrounding rock with time variation under different viscosity coefficients

3 深部高应力软岩巷道围岩力学特性的数值模拟研究

3.1 数值模拟的建立

本论文数值模拟以唐口煤矿井底车场的辅助运输石门为工程背景，建立模拟区域的长×宽×高=60 m×50 m×40 m，共划分 162 321 个单元和 156 000 个节点，本模拟建立的 FLAC^{3D} 模型如图 4 所示。

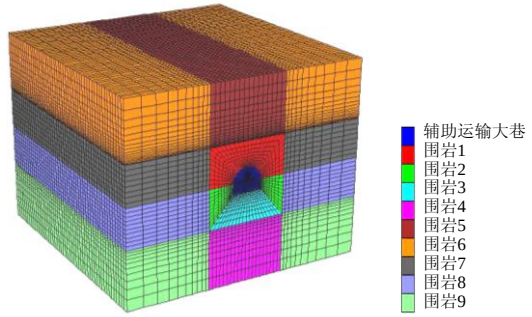

图 4　三维数值模拟模型

Fig. 4　Three-dimensional numerical simulation model

本模型侧面限制水平移动，下表面固定；上表面施加 25.62 MPa 的荷载，模拟上覆岩体的自重边界；基于地应力实测结果及考虑水平构造应力和巷道轴向处于最不利位置（即巷道轴向与最大水平主应力的方向垂直，此时巷道受水平构造应力的影响最大，顶底板稳定性最差，围岩塑性区最大），在模型左右两个侧面施加水平应力为 30.65 MPa，前后两个侧面施加水平应力为 19.15 MPa；工程岩体的物理力学计算参数按照实验室岩石的三轴抗压试验及单轴抗压试验取值，详见表 3；并采用 Burgers 流变模型，揭示反映巷道围岩开挖过程中的流变特性，数值模拟参数详见表 5。

表 5　Burgers 数值模拟参数

Table 5　Burgers numerical simulation parameters

名称	E_M /GPa	E_K /GPa	η_M /(GPa h)	η_K /(GPa h)
数值	1.473	0.334	11.355	0.465

3.2　深部高应力软岩巷道变形破坏特性

为深入研究深部高应力软岩巷道变形破坏特性，本文模拟巷道开挖后不同天数时的围岩位移，比较不同时间的巷道围岩位移的变化，分析巷道围岩位移变化规律。

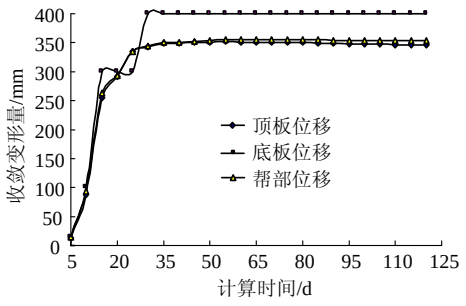

图 5　巷道围岩表面位移随时间的变化曲线

Fig.5　Changing curves of the surface displacement of the surrounding rock with time variation

从图 5 分析可知，在高应力的作用下，软岩巷道围岩变形的流变特性十分显著，巷道围岩的顶板、底板和两帮位移随时间的延续而逐渐增大且最终趋于稳定，并呈现出“巷道底鼓量大于两帮收敛变形量大于拱顶下沉量”的分布规律，这是由于在构造应力场中水平构造应力大于垂直应力，在其挤压作用下造成巷道底鼓量及两帮收敛变形量大于顶板下沉量；由于底板在巷道所处的部位特殊，造成底板暴露时间较长，且支护滞后于巷道顶板和两帮，导致巷道底鼓量较大，底鼓是导致巷道整体失稳破坏的重要因素之一。

4　结　论

1）深部高应力软岩巷道的基本工程地质特征主要包括：① 黏土矿物组成，围岩中含有高岭石、伊利石、蒙脱石含量等膨胀性黏土矿物，黏土矿物的存在在很大程度上决定了软岩的性质，这是形成高应力软岩的内因；② 水理性质，围岩遇水膨胀，且具有一定的吸水软化特性；③ 力学性质，围岩的力学强度较高，只有在较高的应力水平下才会发生变形破坏；在低应力状态下表现为硬岩特性，这也是其成为高应力软岩的直接原因；④ 地应力，地应力整体水平较高，局部水平构造应力显著，高应力是形成高应力软岩的外因。

2）基于 Burgers 流变模型的黏弹性分析可知，巷道围岩的变形可分为衰减变形阶段和稳定变形阶段。原岩应力越高，围岩变形量和变形速率越快，巷道围岩的衰减、稳定变形阶段的斜率也随之增大；随着巷道围岩的弹性模量和黏滞系数的增大，巷道围岩移近量和变形速率而减小，巷道围岩的衰减、稳定变形阶段的斜率也随之减小。

3）FLAC^{3D} 数值模拟结果表明，在高应力的作用下，软岩巷道围岩变形的流变特性十分显著，巷道围岩的顶板、底板和两帮位移随时间的延续而逐渐增大且最终趋于稳定，并呈现出“巷道底鼓量大于两帮收敛变形量大于拱顶下沉量”的分布规律。

参考文献：

[1]　何满潮，谢和平，彭苏萍，等．深部开采岩体力学研究[J]．岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2803-2813．HE Man-chao，XIE He-ping，PENG Su-ping，et al．Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(16)：2803-2813．

[2] 周宏伟，谢和平，左建平．深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]．力学进展，2005，35(1)：91-99．
ZHOU Hong-wei，XIE He-ping，ZUO Jian-ping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances In Mechanics，2005，35(1)：91-99.

[3] 贺永年，韩立军，邵鹏，等．深部巷道稳定的若干岩石力学问题[J]．中国矿业大学学报，2006，35(3)：288-295．
HE Yong-nian，HAN Li-jun，SHAO Peng，et al．Some problems of rock mechanics for roadways stability in depth[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2006，35(3)：288-295.

[4] 高延法，曲祖俊，牛学良，等．深井软岩巷道围岩流变与应力场演变规律[J]．煤炭学报，2007，32(12)：1244-1252．
GAO Yan-fa，QU Zu-jun，NIU Xue-liang，et al. Rheological law for softrock tunnel and evolution law for stress f ield in deep mine[J]. Journal of China Coal Society，2007，32(12)：1244-1252.

[5] 张向东，李永靖，张树光，等．软岩蠕变理论及其工程应用[J]．岩石力学与工程学报，2004，23(10)：1635-1639．
ZHANG Xiang-dong，LI Yong-jing，ZHANG Shu-guang，et al．Creep theory of soft rock and its engineering application[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(10)：1635-1639.

[6] 余伟健，高谦，张周平，等．构造带围岩特性实验及流变规律分析[J]．中南大学学报，2009，40(4)：1086-1091．
YU Wei-jian，GAO Qian，ZHANG Zhou-ping，et al. Characteristics experimental of surrounding rock mass in tectonic zone and its rheological law analysis[J]．Journal of Central South University，2009，40(4)：1086-1091.

[7] 彭苏萍，王希良，刘咸卫，等．“三软”煤层巷道围岩流变特性试验研究[J]．煤炭学报，2001，26(2)：149-152．
PENG Shu-ping，WANG Xi-liang，LIU Xian-wei，et al. Research on rhelogical characteristics of rock in the weak coal2bearing strata[J]．Journal of China Coal Society，2001，26(2)：149-152.

[8] 刘高，聂德新，韩文峰．高应力软岩巷道围岩变形破坏研究[J]．岩石力学与工程学报，2000，19(6)：721-730．
LIU Gao，NIE De-xin，HAN Wen-feng. Deformation and failure of surround ing rocksof roadway in high stressed soft rocks[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2000，19(6)：721-730.

[9] 张后全，韩立军，贺永年，等．构造复杂区域膨胀软岩巷道底鼓控制研究[J]．采矿与安全工程学报，2011，28(1)：16-27．
ZHANG Hou-quan，HAN Li-jun，HE Yong-nian，et al. Floor heave control in roadways with soft-and-swelling rocks in complicated structural area[J]．Journal o f Mining & Safety Engineering，2011，28(1)：16-27.

[10] 柏建彪，李文峰，王襄禹，等．采动巷道底鼓机理与控制技术[J]．采矿与安全工程学报，2011，28(1)：1-5．
BAI Jian-biao，LI Wen-feng，WANG Xiang-yu，et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining[J]．Journal of Mining & Safety Engineering，2011，28(1)：1-5.

[11] 张百红，韩立军，韩贵雷，等．深部三维地应力实测与巷道稳定性研究[J]．岩土力学，2008，29(9)：2547-2555．
ZHANG Bai-hong，HAN Li-jun，HAN Gui-lei，et al. Study of 3D in-situ stress measurement and stability of roadways in depth[J]．Rock and Soil Mechanics，2008，29(9)：2547-2555.

[12] 何满潮，彭涛．高应力软岩的工程地质特征及变形力学机制[J]．矿山压力与顶板管理，1995，12(2)：8-11．
HE Man-chao，PENG Tao．High stress soft rock masses engineering properties and deformation mechanism[J]. Ground Pressure and Strata Control，1995，12(2)：8-11.

[13] 何满潮．深部的概念体系及工程评价指标[J]．岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2854-2858．
HE Man-chao．Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(16)：2854-2858.

[14] 谢和平，陈忠辉．岩石力学[M]．北京：科学出版社，2004：64-95．